

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПЕКТРОГРАММ РАСТИТЕЛЬНЫХ ТКАНЕЙ ПРИ РАЗЛИЧНОМ ВРЕМЕНИ ЭКСПОЗИЦИИ И УРОВНЕ ОСВЕЩЕННОСТИ

В. А. Юдаев¹✉, П. В. Балабанов², Т. А. Чупахина²

*Лаборатория «Интеллектуальные беспилотные робототехнические платформы»,
управление фундаментальных и прикладных исследований (1), pt-arta@yandex.ru;
кафедра «Мехатроника и технологические измерения» (2),
ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: время экспозиции; гиперспектральная камера; гиперспектральная съемка; уровень освещенности.

Аннотация: Рассмотрены проблемы полевого использования существующих информационно-измерительных систем фитомониторинга, в основе которых применяют методы гиперспектрального контроля. Проведены исследования влияния времени экспозиции кадра и уровня освещенности объектов контроля растительного происхождения на получаемые спектрограммы. Даны рекомендации для проведения анализа с помощью метода главных компонент по выявлению ошибок при разметке спектрограмм и формировании обучающей выборки.

Введение

В настоящее время в мире активно развиваются технологии машинного зрения с применением различных методов распознавания объектов растительного происхождения. Наряду с применяемыми, ставшими уже распространенными в повседневной жизни методами определения различных классов объектов с применением камер видимого диапазона и сверточных нейронных сетей, активно развиваются методы гипер- и мультиспектрального контроля, которые позволяют обнаружить скрытые дефекты плодов, болезни растений.

В лабораторных условиях получение гиперспектральных изображений и последующий их анализ осуществляются без существенных затруднений. Наличие источников освещения постоянной и заданной яркости, автоматизированная калибровка параметров гиперспектральной камеры, включающая, в том числе, калибровку расстояния до объекта и автоматический выбор времени экспозиции, позволяют получать изображения, характеризующиеся высоким пространственным разрешением, минимальными геометрическими искажениями и отсутствием размытия. Это обеспечивает точность получаемых данных и возможность получения результатов их анализа с требуемым уровнем доверительной вероятности.

Применение информационно-измерительных систем фитомониторинга на основе методов гиперспектрального контроля в полевых условиях сопряжено с рядом ограничений. Изменение уровня освещенности объектов контроля, вызванное атмосферными факторами, например, переменной облачностью, оказывает существенное влияние на результаты анализа изображений, требует автоматической корректировки времени экспозиции при съемке. В условиях интенсивной солнечной освещенности возможно возникновение засвеченных участков изображения, что негативно сказывается на получении обучающих выборок. Кроме того, воздействие ветра может вызывать динамические деформации объекта съемки,

приводящие к размытию контуров и снижению четкости изображения, что затрудняет последующую обработку и анализ данных. Поэтому на текущий момент, указанные факторы снижают эффективность практического применения методов гипер- и мультиспектрального контроля в полевых условиях.

Оценку влияния указанных выше факторов рассматривали авторы многих работ. Так, например, в работе [1] отражена проблема получения гиперспектральных данных для оценки вегетационного индекса NDVI с учетом геометрической особенности объектов контроля и их неравномерного освещения. В работе [2] исследуется проблема калибровки гиперспектральных камер, снимаемых с воздуха беспилотным пилотируемым летательным аппаратом, с учетом динамического изменчивого уровня освещенности. В статье [3] проводились исследования по влиянию фактора освещенности наряду с техническими параметрами различных камер и методов предварительной обработки и анализа на достоверность результата получаемой информационной системы. Влияние источников освещения и разработка методики уменьшения влияния шумов на результат получаемых гистограмм отражены в работе [4]. Недостаточный уровень освещенности оказывает большое влияние на получаемую спектрограмму объекта. В исследовании [5] подробно рассмотрена данная проблема и предложено ее решение с использованием комбинированной подсветки на различных длинах волн излучения.

Цель работы – экспериментальное исследование влияния уровня освещенности на спектрограмму объекта гиперспектрального контроля. Для этого необходимо получить гиперспектральные изображения яблони в полевых условиях при различных уровнях освещения отдельных частей ее кроны, исследовать влияние времени экспозиции кадра и уровня освещенности на спектрограммы растительных тканей объекта исследования.

Влияние времени экспозиции кадра на получаемые спектрограммы листьев яблони в условиях естественного освещения

Отметим, что для повышения точности классификации объектов контроля по гиперспектральным данным необходимо, как правило, получать достаточно большой набор обучающей выборки, представляющей собой гиперспектральные изображения объектов одного класса. При классификации растительных тканей, в большинстве случаев, получают изображения объектов контроля, которые неравномерно освещены, при различных уровнях освещенности и времени экспозиции кадра, что оказывает влияние на получаемое гиперспектральное изображение и, как следствие, на точность классификации. Поэтому требуется оценка влияния указанных условий на результаты гиперспектральной съемки.

В качестве объекта контроля использована яблоня, расположенная на территории корпуса ФГБОУ ВО «ТГТУ» по адресу г. Тамбов, ул. Советская, д. 116. Гиперспектральные изображения получили 10 октября 2024 года в утреннее время в период с 10:00 до 10:30. Согласно метеорологическим данным наблюдалась преимущественная облачность, температура воздуха составляла +11 °С, ветер северный с порывами до 2,0 м/с, атмосферное давление 749 мм рт. ст.

Для съемки яблони использовалась гиперспектральная камера Cubert Ultris X20 с диапазоном 350...1000 нм, установленная на штативе. Перед началом съемки проводилась автоматическая калибровка ее параметров. Получено 30 гиперспектральных изображений кроны яблони с временем экспозиции, равным 5, 10, 15, 20 мс, а также автоматически определяемым временем, на основе программно-алгоритмического обеспечения камеры, предоставленного ее производителем. Гиперспектральные изображения представляли массив из 164 монохромных изображений (рис. 1, а), полученных на длине волны λ (от 350 до 1000 нм с шагом 4 нм) размерностью 410 × 410 пикселей.

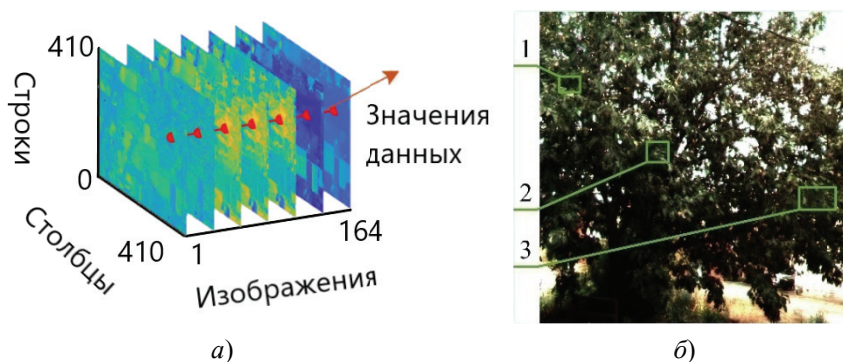


Рис. 1. Гиперспектральное изображение:
a – гиперкуб; *б* – двумерное изображение кроны яблони

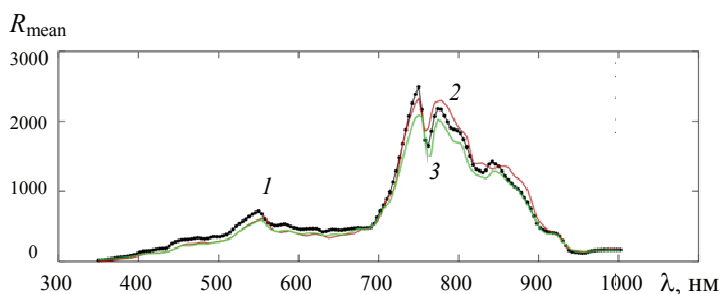


Рис. 2. Пример спектрограмм листьев яблони,
полученных с поверхности трех различных областей (см. рис. 1, *б*, области 1 – 3)

Для дальнейшего анализа на гиперспектральных изображениях выделяли области (1 – 3 на рис. 1, *б*), на которых отчетливо виден лиственный покров яблони. Далее с использованием программного обеспечения Cubert Utils Touch получали усредненные спектрограммы, характерные для выделенных областей (рис. 2). Каждая такая спектрограмма представляет собой график зависимости от длины волны средней условной яркости R_{mean} пикселей выделенной области изображения. Здесь под условной яркостью понимается значение пикселя изображения, пропорциональное времени экспозиции кадра, уровню освещенности объекта контроля, а также разрядности получаемого изображения (поскольку изображение может быть сохранено в 10 или 12 разрядном виде).

Для количественной оценки степени «похожести» между собой спектрограмм, полученных с поверхности трех областей, использовали критерий, определяемый выражением

$$S_i = \int_{350}^{1000} R_{\text{mean}1} R_{\text{mean}i} d\lambda, \quad i=1,2,3, \quad (1)$$

где $R_{\text{mean}1}$, $R_{\text{mean}i}$ – спектрограммы, полученные с поверхности первой и i -й областей соответственно.

При этом максимальное значение искомого критерий принимает при сравнении спектрограммы, полученной с поверхности первой области контроля, с самой собой.

Для автоматической экспозиции (54 мс): $S_1 = 5,79 \cdot 10^{-8}$, $S_2 = 5,82 \cdot 10^{-8}$, $S_3 = 4,98 \cdot 10^{-8}$.

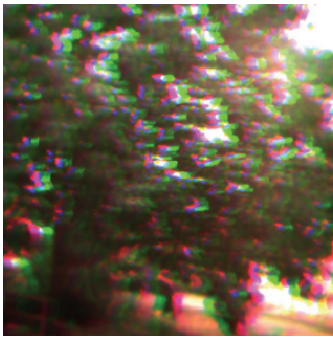


Рис. 3. Фотография яблони при порывах ветра до 8 м/с и времени экспозиции 54 мс

Для экспозиций:
 5 мс: $S_1 = 3,02 \cdot 10^{-6}$, $S_2 = 3,13 \cdot 10^{-6}$, $S_3 = 2,63 \cdot 10^{-6}$;
 10 мс: $S_1 = 15,08 \cdot 10^{-6}$, $S_2 = 15,09 \cdot 10^{-6}$,
 $S_3 = 13,46 \cdot 10^{-6}$;
 15 мс: $S_1 = 3,81 \cdot 10^{-7}$, $S_2 = 3,85 \cdot 10^{-7}$, $S_3 = 3,39 \cdot 10^{-7}$;
 20 мс: $S_1 = 5,79 \cdot 10^{-7}$, $S_2 = 5,82 \cdot 10^{-7}$, $S_3 = 4,98 \cdot 10^{-7}$.

Из анализа полученных данных можно сделать вывод о том, что при увеличении времени экспозиции средняя условная яркость R_{mean} пикселей увеличивается. При автоматическом выборе времени экспозиции средний уровень яркости объектов контроля на изображении выше, чем при заданных значениях от 5 до 20 мс. Это, с одной стороны, позволит повысить точность последующей

классификации растительных тканей по спектрограмме, с другой – увеличение времени экспозиции приводит к появлению «размытостей» на изображении (рис. 3), например, вследствие порывов ветра или колебаний камеры, установленной на подвижную наземную или летающую платформу.

Тем не менее из анализа данных следует, что форма спектрограмм схожа при значительной разнице в амплитуде. Последнее позволяет при выделении областей и последующей разметке полученных с них спектрограмм отнести к одному классу области с разным уровнем освещенности, например, находящиеся в тени и на солнце. Отметим, что под разметкой понимается присваивание спектрограмме метки – числового значения, определяющего принадлежность спектрограммы к заданной категории растительной ткани.

Влияние различий в уровне освещенности растительной ткани листа на получаемые спектрограммы

В данной части работы проведены исследования влияния уровня освещенности на степень «похожести» получаемых спектрограмм растительной ткани листа. Измерения уровня освещенности проводились люксметром Ю116 с установленным фотозлементом Ф55С и насадкой К, М. Объект контроля – установленное на подоконнике комнатное растение (рис. 4), источник освещения – естественный (оконный проем). Съемка проводилась при постоянном времени экспозиции 150 мс и при следующих значениях уровня освещенности: 140, 240, 270, 320, 350 и 520 лк. Полученные спектрограммы представлены на рис. 5, а. Для сравнения спектрограмм использовалось выражение

$$S_i = \int_{350}^{1000} R_{\text{mean}520} R_{\text{mean}i} d\lambda, \quad (2)$$

где $R_{\text{mean}520}$, $R_{\text{mean}i}$ – спектрограммы, полученные при уровне освещения 520 лк и при уровне из ряда значений $i = 520, 140, 240, 270, 320, 350$ лк соответственно.

Результаты расчетов по выражению (2) представлены на рис. 5, б. Спектрограммы, полученные при уровнях освещенности 520, 320, 350 лк имеют наибольшую схожесть между собой, что объясняется, по нашему мнению, существенным влиянием амплитуды спектрограммы на значение вычисляемого критерия S .



Рис. 4. Гиперспектральное изображение с выделенной областью для исследования

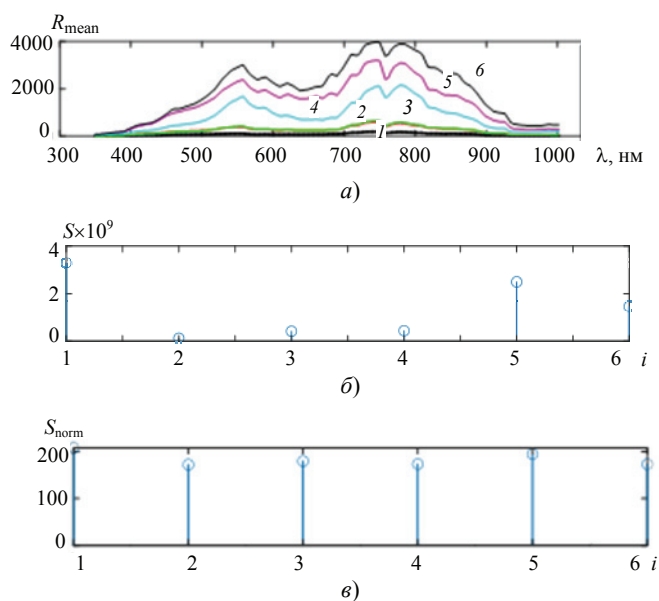


Рис. 5. Спектрограммы растения при различных уровнях освещенности (а) и результаты расчета критерия S при использовании ненормированных (б) и нормированных (в) спектрограмм:

1 – 140 лк, 2 – 240 лк, 3 – 270 лк, 4 – 320 лк, 5 – 350 лк, 6 – 520 лк

Для уменьшения влияния различий в уровнях яркости освещенности растительных тканей на получаемые спектрограммы проводили их нормализацию по выражению

$$R_{\text{norm}\lambda} = R_{\text{mean}\lambda} / \max[R_{\text{mean}\lambda}], \quad (3)$$

где $R_{\text{mean}\lambda}$ – средняя условная яркость пикселей в области, с которой получена спектрограмма, на длине волны λ ; $\max[R_{\text{mean}\lambda}]$ – максимальное значение среди ряда условных яркостей пикселей, найденное по соответствующей спектрограмме. После нормирования спектрограмм вычисляли значения критерия S по (2), используя вместо $R_{\text{mean}520}$, $R_{\text{mean}i}$ соответствующие нормированные значения по (3) (см. рис. 5, в).

Из приведенного анализа результатов можно сделать вывод о том, что уровень освещенности влияет только на амплитуду сигнала, после нормализации сигналы становятся идентичными в рамках погрешности сигнала.

Рекомендации по уменьшению влияния ошибок, возникающих при разметке спектрограмм, на точность классификации растительных тканей

Человеком, выделяющим области на полученных гиперспектральных изображениях, содержащих, по его мнению, растительные ткани одного класса, могут быть допущены ошибки. Это, прежде всего, является следствием существенных отличий в уровнях освещенности различных областей объекта контроля. Так, область, содержащая ветки или ствол, на темном изображении может быть ошибочно принята как область, содержащая листья. Полученная с ее поверхности спектрограмма, использованная в обучающей выборке, приведет к дополнитель-

ным ошибкам классификации. Поэтому помимо нормализации спектрограмм требуется проводить предварительный анализ обучающей выборки и удалять из нее потенциально ошибочно размеченные спектрограммы.

Для выявления групп объектов, использующих схожие характеристики, применяется метод главных компонент (*англ.* Principal Component Analysis (PCA)), который позволяет преобразовывать исходные данные в более удобную для анализа форму. Он представляет собой новый набор переменных, которые получают в результате линейного преобразования исходных данных. Этот метод используется для идентификации скрытых признаков, упрощения моделей и упрощенной визуализации различий признаков объектов.

Для проведения исследования получена выборка из 640 спектрограмм с поверхности листьев яблони и 640 спектрограмм с поверхности веток и ствола. Каждой из спектрограмм, в зависимости от того, с какой области она получена, присваивалась метка, устанавливающая принадлежность спектрограммы к одной из двух категорий: 0 – «листья», 1 – «ствол или ветки». К полученным данным применен метод PCA, позволивший отобразить принадлежность отдельных спектрограмм к заданным категориям. На рисунке 6 объекты с метками 0 и 1 образуют выраженные кластеры – области А и Б соответственно. Однако отдельные точки, соответствующие объектам категорий 0 и 1, попадают в области Б и А соответственно. Это может означать неверную разметку спектрограмм, что при обучении модели классификации приведет к ошибкам. Кроме того, на рисунке видна отдельная группа точек, образующих область В. Это говорит о вероятном наличии третьей категории объектов, которые не учтены при разметке спектрограмм.

Таким образом, с помощью PCA установлена возможность классификации двух категорий объектов, а также возможность исключения неверно размеченных спектрограмм из обучающей выборки, что позволило повысить точность классификации. Область В (см. рис. 6) может указывать как на наличие неучтенной категории объектов, так и использование спектрограмм, полученных при малом времени экспозиции или при недостаточном уровне освещенности, что приводит к существенному отличию спектрограмм.

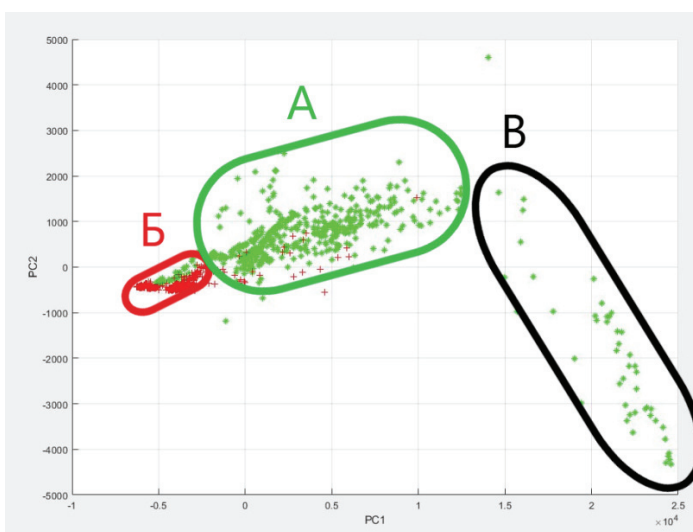


Рис. 6. Применение метода PCA для классификации объектов категорий «Листья» (*) и «Ствол» (+)

Заключение

Как показали результаты исследования информационно-измерительных систем гиперспектрального фитомониторинга, при анализе спектрограмм растительных тканей следует нормировать получаемую спектрограмму. Помимо этого, при подготовке обучающей выборки необходимо осуществлять PCA-анализ, с помощью которого выявлять неверно размеченные спектрограммы, удаляя их из обучающей выборки.

Полученные результаты можно применить при разработке алгоритмического обеспечения информационно-измерительных систем, применяемых для гиперспектрального фитомониторинга в полевых условиях.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта «Разработка роботизированного комплекса наземной и воздушной беспилотных платформ для применения в агротехнологиях» (ЕГИСУ НИОКТР: 124062100023-3).

Список литературы

1. Elimination of Leaf Angle Impacts on Plant Reflectance Spectra Using Fusion of Hyperspectral Images and 3D Point Clouds / L. Zhang, J. Jin, L. Wang, T. U. Rehman, M. T. Gee Jr // *Sensors*. – 2023. – Vol. 23, No. 1. – 44 p. doi: 10.3390/s23010044
2. Ihalainen, O. Physically based illumination correction for sub-centimeter spatial resolution hyperspectral data / O. Ihalainen, J. Juola, M. Möttönen // *Remote Sensing of Environment*. – 2023. – Vol. 298, No. 2. – P. 113810. doi: 10.1016/j.rse.2023.113810
3. Hyperspectral system trade-offs for illumination, hardware and analysis methods: A case study of seed mix ingredient discrimination / C. B.-P. del Notario, C. Lopez-Molina, A. Lambrechts, W. Saeys // *Journal of Spectral Imaging*. – 2020. – Vol. 9, No. 1. – P. 1 – 17. doi: 10.1255/jsi.2020.a16
4. Simoncic, U. Hyperspectral Imaging with Active Illumination: A Theoretical Study on the Use of Incandescent Lamp and Variable Filament Temperature / U. Simoncic, M. Milanic // *Sensors*. – 2023. – Vol. 23, No. 23. – P. 9326. doi: 10.3390/s23239326
5. Hyperspectral Imaging under Low Illumination with a Single Photon Camera / A. Griffiths, H. Chen, J. Hermsdorf, D. D.-U. Li, R. K. Henderson, M. J. Strain, M. Dawson // *IEEE British and Irish Conference on Optics and Photonics, BICOP*. 2018. – P. 1 – 4. doi: 10.1109/BICOP.2018.8658323

Comparative Analysis of Plant Tissues Spectrograms at Various Exposure Times and Illumination Levels

V. A. Yudaev¹✉, P. V. Balabanov², T. A. Chupakhina²

Intelligent Unmanned Robotic Platforms Laboratory, Fundamental and Applied Research Department (1), pt-arta@yandex.ru; Department of Mechatronics and Technological Measurements (2), TSTU, Tambov, Russia

Keywords: exposure time; hyperspectral camera; hyperspectral imaging; illumination level.

Abstract: The article examines the challenges of field use of existing phytomonitoring information and measurement systems based on hyperspectral control methods. The influence of frame exposure time and illumination level of plant-based test objects on the resulting spectrograms was studied. Recommendations were provided for conducting PCA analysis to identify errors in spectrogram labeling and generating a training set.

References

1. Zhang L., Jin J., Wang L., Rehman T. U., Gee Jr M.T. Elimination of Leaf Angle Impacts on Plant Reflectance Spectra Using Fusion of Hyperspectral Images and 3D Point Clouds, *Sensors*, 2023, vol. 23, no. 1, 44 p. doi: 10.3390/s23010044
2. Ihalainen O., J. Juola, Mõttus M. Physically based illumination correction for sub-centimeter spatial resolution hyperspectral data, *Remote Sensing of Environment*, 2023, vol. 298, no. 2, pp. 113810. doi: 10.1016/j.rse.2023.113810
3. del Notario C. B.-P., Lopez-Molina C., Lambrechts A., Saeys W. Hyperspectral system trade-offs for illumination, hardware and analysis methods: A case study of seed mix ingredient discrimination, *Journal of Spectral Imaging*, 2020, vol. 9, no. 1, pp. 1-17. doi: 10.1255/jsi.2020.a16
4. Simonic U., Milanic M. Hyperspectral Imaging with Active Illumination: A Theoretical Study on the Use of Incandescent Lamp and Variable Filament Temperature, *Sensors*, 2023, vol. 23, no. 23, pp. 9326. doi: 10.3390/s23239326
5. Griffiths A., Chen H., Herrnsdorf J., Li D.D.-U., Henderson R.K., Strain M.J., Dawson M. Hyperspectral Imaging under Low Illumination with a Single Photon Camera, *IEEE British and Irish Conference on Optics and Photonics, BICOP*, 2018, pp. 1-4. doi: 10.1109/BICOP.2018.8658323

Vergleichende Analyse der Spektrogramme von Pflanzengewebe bei unterschiedlichen Belichtungszeiten und Lichtniveaus

Zusammenfassung: Dieser Artikel untersucht die Herausforderungen des Feldeinsatzes bestehender Phytomonitoring-Informations- und Messsysteme auf Basis hyperspektraler Kontrollmethoden. Der Einfluss der Bildbelichtungszeit und der Beleuchtungsstärke pflanzlicher Objekte auf die resultierenden Spektrogramme ist untersucht. Es sind Empfehlungen zur Durchführung der PCA-Analyse zur Identifizierung von Fehlern bei der Spektrogrammbeschriftung und zur Erstellung des Trainingsdatensatzes gegeben.

Analyse comparative des spectrogrammes de tissus végétaux à différents temps d'exposition et niveaux de lumière

Résumé: Sont considérés les problèmes de l'utilisation sur le terrain des systèmes d'information et de mesure existants de phytomonitoring, qui sont basés sur des méthodes de contrôle hyperspectral. Sont menées des études sur l'influence du temps d'exposition du cadre et du niveau d'éclairage des objets de contrôle d'origine végétale sur les spectrogrammes obtenus. Sont données des recommandations à propos de l'analyse PCA pour détecter les erreurs de marquage des spectrogrammes et la formation d'un échantillon d'apprentissage.

Авторы: *Юдаев Виктор Алексеевич* – младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Интеллектуальные беспилотные робототехнические платформы», управление фундаментальных и прикладных исследований; *Балабанов Павел Владимирович* – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Мехатроника и технологические измерения»; *Чупахина Татьяна Александровна* – аспирант кафедры «Мехатроника и технологические измерения», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.